

Izrada optimalnih transportnih ruta korišćenjem softvera otvorenog koda

NIKOLA Č. STANČIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

JOVAN D. KOVAČEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Građevinski fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 656.135:519.816]:004

DOI: 10.5937/tehnika1804486S

Rutiranje vozila ima veliku ulogu u industriji, prvenstveno u kompanijama koje se bave organizovanjem transporta dobara do krajnjih korisnika. Teorijska pozadina problema rutiranja vozila je već dugi niz godina poznata i na osnovu nje je razvijeno mnoštvo komercijalnih softverskih rešenja. Međutim, u praksi se javlja prepreka u vidu nedostatka pristupačnih softverskih rešenja. Ograničenje predstavlja i otežan pristup kvalitetnim i pouzdanim prostornim podacima koji se odnose na putnu mrežu. U radu su ispitane mogućnosti primene softvera otvorenog koda za rešavanje ovog NP-teškog problema. Kao osnova za modelovanje grafa mreže saobraćajnica, uzeti su slobodni prostorni podaci OpenStreetMap-a, udruženog projekta virtualne zajednice. Eksperiment je izvršen nad podacima o vozilima i korisnicima jednog trgovinskog lanca i odnosi se na područje Srbije.

Ključne reči: problem rutiranja vozila, lokacijski bazirani servisi, ODL Studio, OpenStreetMap, softver otvorenog koda

1. UVOD

Problem rutiranja vozila (engl. Vehicle Routing Problem – VRP) jeste proces izbora skupa najpovoljnijih puteva u mreži saobraćajnica po kojima bi vozila trebalo da se kreću prilikom usluživanja skupa korisnika. Predstavlja generalizaciju problema trgovačkog putnika (engl. Traveling Salesman Problem – TSP). Problem su prvi put predstavili Džordž Dancig i Džon Remzer 1959. godine [1], nazvavši ga problemom raspoređivanja kamiona. Ovakvi problemi, koji se nazivaju i problemima usmeravanja, javljaju se stalno i u različitim sferama života. Bilo da se radi o poslovnoj logistici ili o turističkom razgledanju znamenitosti, poželjno je pronaći najprikladniji i najbrži način za stizanje od tačke A do tačke B.

Metode rutiranja vozila svoju primenu nalaze u različitim oblastima, a među veoma zastupljenim oblastima interesovanja se sasvim logično nalaze transportne mreže. U njima proces rutiranja može biti implementiran za potrebe organizovanja transporta ljudi ili, češće, robe. Ruta obuhvata kompletan put koji jedno

vozilo pređe polazeći iz centralnog skladišta, obilazeći predviđene lokacije i na kraju se vraćajući u centralno skladište. Rutom se specificira redosled lokacija koje treba posetiti, dok se vremenskim rasporedom preciziraju vremena kada će se na ovim lokacijama obaviti aktivnost [2]. Zadatak treba da se izvrši u zadatom vremenu i koristeći postojeću putnu mrežu teritorije od interesa, pritom minimizujući troškove. Svi zahtevi korisnika moraju biti ispunjeni, a sva nametnuta ograničenja ispoštovana. Svaki korisnik se uslužuje tačno jednom, a rešenje problema mora da bude takvo da nosivosti vozila nisu prekoračene ni u jednom trenutku [3].

Upravljanje transportom je centralni problem u logistici jedne kompanije, a izbor optimalnih ruta jedna je od ključnih funkcija u tom procesu. Ako se kreiranje ruta za isporuku dobara do korisničkih lokacija prepusti računaru, ostvaruju se višestruke koristi – dobijeno rešenje je optimalno, tj. efikasnije, a ujedno se troši manje vremena na planiranje transporta dobara. Podaci govore da korišćenjem kompjuterske optimizacije kompanije mogu da postignu uštede na transportu i do 5 procenata [4]. Dodatno, teorijske postavke u vezi s različitim metodama optimizacije rešavanja logističkih problema detaljno su istražene i dobro poznate decenijama unazad. Međutim, i pored toga, u praksi mnoge kompanije i danas na operativnom nivou optimizacije transporta robe više primenjuju iskustvene metode. Razloga za ovakvu situaciju ima nekoliko, a ključni je

Adresa autora: Nikola Stančić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: nikola.c.stancic@gmail.com

Rad primljen: 21.05.2018.

Rad prihvaćen: 18.07.2018.

dominacija komercijalnih rešenja ove namene. Zbog toga je osnovna ideja rada bila ispitivanje mogućnosti izrade optimalnih transportnih ruta primenom svima dostupnih open source alata. Pretpostavka je da se jedan ovakav sistem može uspešno izabrati s problematikom optimizacije transporta. Predmet obrade je bio softver Open Door Logistics Studio [5].

Kako se rute baziraju na postojećim saobraćajnicama, vrlo važan resurs za primenu metoda rutiranja u oblasti transporta jeste kvalitetna transportna mreža puteva. Pored brojnih komercijalnih servisa koji nude veb-karte (npr. Google Maps, Bing Maps, Here), za svoje mesto se izborio i jedan udruženi projekat virtualne zajednice – OpenStreetMap [6]. Upravo su ovi besplatni prostorni podaci korišćeni u okviru rada.

2. POSTAVLJANJE, MODELOVANJE I REŠAVANJE PROBLEMA RUTIRANJA VOZILA

Suštinski problem rutiranja vozila se može jednostavno postaviti. Kao ulazni podaci, dobijaju se raspoloživi vozni park, skup čvorova s poznatim lokacijama koji predstavljaju korisnike koje flota vozila treba da usluži i graf putne mreže koji predstavlja postojeće saobraćajnice. Mreža saobraćajnica koja se koristi za transport dobara se modeluje grafom čiji lukovi predstavljaju saobraćajnice, a čvorovi raskrsnice, skladišta ili korisnike. Lukovi mogu biti jednosmerni ili dvosmerni, a uz svaki luk postoji težina koja je najčešće u direktnoj vezi s udaljenošću i vremenom putovanja vozila.

Problem koji se nameće se sastoji od pronalaženja izvodljivog skupa ruta, po jedna za svako vozilo, tako što će se minimizovati troškovi (pređena kilometraža, utrošak goriva, potrebno vreme, broj angažovanih vozila itd), a pritom zadovoljiti sva ograničenja i zahtevi (radno vreme, broj obaveznih stanica, maksimalno trajanje vožnje, posebni korisnički zahtevi itd). Osnovni rezultat svih sistema za rutiranje vozila i planiranje redosleda isporuke je u suštini isti: potrebno je svakom vozilu (ili vozaču) pridružiti rutu i vremenski raspored obilaska na njoj.

Osnovni model problema rutiranja vozila karakteriše ograničenja kapaciteta i nosi naziv kapacitivni problem rutiranja vozila (engl. Capacitated Vehicle Routing Problem – CVRP). U njemu, svako vozilo ima definisanu vrednost maksimalnog kapaciteta (svoju nosivost), a za svakog korisnika se vodi podatak o količini robe koju mu treba dostaviti ili koju treba preuzeti od njega. U zavisnosti od dodatnih ograničenja koja se uvode, postoji širok dijapazon varijanti CVRP-a.

S obzirom na to da problem rutiranja vozila spada u kategoriju NP-teških problema, njegovo rešavanje se

smatra jednim od najizazovnijih zadataka kombinatornog optimizovanja. Za takve probleme je poželjno dobiti aproksimativno rešenje koje se može naći dovoljno brzo i koje je dovoljno precizno. Trenutno najdelotvornijim egzaktnim algoritmima je moguće je rešiti problem rutiranja vozila samo u slučajevima gde je broj korisnika relativno mali. Po podacima u radu [7], taj broj nije veći od 50, dok sličan podatak daje i nešto noviji izvor u radu [8], gde se navodi da egzaktna metode imaju limit od 50 do 100 porudžbina, u zavisnosti od primenjene varijante problema rutiranja i od zahtevanog vremena odziva. Realni problemi koje može da ima neka kompanija imaju znatno više korisnika, pa se pomoću egzaktnog pristupa ne mogu rešiti u prihvatljivom vremenu. Zbog toga je danas akcenat stavljen na rešavanje problema isključivo pomoću heurističkih i metaheurističkih algoritama koji se efektivno nose s ovom problematikom.

3. OPEN DOOR LOGISTICS STUDIO

Open Door Logistics Studio, tj. ODL Studio [5] je besplatan i open source desktop softver namenjen pronalaženju optimalnih rešenja za probleme iz oblasti logistike. U okviru njega su razvijeni alati za analizu i manipulaciju podacima o lokacijama korisnika, oblikovanje i kartiranje teritorije na kojoj se obavlja prodaja/isporka i, što je za ovaj rad najvažnije, optimizaciju rutiranja vozila i kreiranja redosleda posećivanja lokacija. Organizovan je po skriptovima koji predstavljaju posebne module, gde svaki implementira jednu konkretnu funkcionalnost.

Ono po čemu je ODL Studio karakterističan jeste što, za razliku od klasičnih GIS softvera i softvera slične namene, podaci koje ova aplikacija koristi se nalaze u .XLS formatu, tj. u jednostavnoj Microsoft Excel tabeli. Time je omogućeno da se podaci bez problema mogu naizmenično uređivati u ODL Studio-u i u MS Excel-u. Jednostavnost ovog formata osigurava interoperabilnost s drugim sistemima.

ODL Studio za potrebe rutiranja vozila koristi besplatnu biblioteku za rutiranje GraphHopper napisanu u Javi i skup alata (engl. toolkit) otvorenog koda jsprit koji je specijalizovan za rešavanje problema trgovačkog putnika i problema rutiranja vozila. Detaljan opis karakteristika, sadržaja i API-ja Java biblioteke za rutiranje GraphHopper dostupan je na [9]. Korišćenjem ODL Studio-a i pomenutih dodataka se mogu modelovati različite varijante problema rutiranja vozila s ograničenjem kapaciteta. Pored ODL Studio-a, u ponudi se nalaze i alati ODL Live i ODL Connect. ODL Live je servis zasnovan na računarstvu u oblaku koji je sposoban da u realnom vremenu obezbedi optimizovano rešenje problema rutiranja. Alat ODL Connect omogućava da se sve funkcionalnosti pozivaju iz komandne linije operativnog sistema i osmišljen je sa

ciljem da se ODL Studio ugradi u veće poslovne informacione sisteme, uz mogućnosti da se optimizacija ruta ili neki druga naredba pokreće u pozadini [5].

4. EKSPERIMENT

Na osnovu teorijskih razmatranja i opisa softverskih alata i biblioteka za rešavanje problema rutiranja, izvršen je eksperiment u kome je testiran rad s realnim podacima. U ovom poglavlju je prikazano koje je podatke neophodno obezbediti, kako se vrši prilagođavanje podataka i uspostavljanje okruženja i, na kraju, kakve su mogućnosti kreiranja optimalnih ruta i rasporeda obilaska za vozila voznog parka u okviru softvera otvorenog koda Open Door Logistics Studio.

Da bi softver mogao da pristupi rešavanju problema rutiranja vozila, neophodno je snabdeti ga potrebnim ulaznim podacima:

- postojeće saobraćajnice na teritoriji od interesa;
- karakteristike voznog parka i vozila koja mu pripadaju;
- lokacije korisnika i osnovni podaci o njima;
- korisnička ograničenja i zahtevi.

Teritorija za koju su rešavani optimizacioni zadaci jeste područje Srbije. Putna mreža Srbije preuzeta je iz OpenStreetMap podataka koji su kompatibilni s bibliotekom GraphHopper i softverom ODL Studio. Podaci koji se tiču raspoloživih vozila i lokacija koje treba obići su preuzeti iz baze sistema za upravljanje voznim parkom trgovinskog lanca.

Ograničenja koja su uzeta u obzir prilikom kreiranja optimalnog rešenja su izražena kroz odgovarajuće kolone u ulaznim tabelama. Postoje ograničenja nosivosti dostavnih vozila i vremenski prozori koji su definisani i za vozila, i za korisničke lokacije. Dodatno, dva su tipa korisnika: jedan deo korisnika zahteva isporuku robe na njihove lokacije, dok drugi deo korisnika zahteva da se s njihovih lokacija preuzme određena količina robe.

Stoga, u eksperimentalnom delu rada je ilustrovano rešavanje kapacitivnog problema rutiranja vozila s vremenskim ograničenjima i istovremenom dostavom i prikupljanjem (engl. Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Pickup and Delivery – CVRPTWSPD).

Priprema grafa putne mreže

GraphHopper putnu mrežu zadate teritorije modeluje u vidu grafa čiji lukovi predstavljaju saobraćajnice, a čvorovi raskrsnice, skladišta ili korisnike. Ovako dobijeni graf se čuva u okviru nekoliko različitih datoteka i potom koristi za izračunavanje razdaljina i vremena putovanja između čvorova. Osnovu grafa putne mreže predstavljaju najažurniji originalni podaci OSM-a koji su za potrebe zadatka preuzeti sa servera

nemačke firme Geofabrik u .OSM.PBF formatu. Kreiranje grafa se obavlja preko komandne linije operativnog sistema, komandom:

```
java -Xmx2G -jar graphhopper-fat-jar-1.0.jar
config=config.properties osmreader.osm=/putanja do
.OSM.PBF datoteke/
```

Slična modelovanja grafa su moguća za druge tipove prevoznih sredstava, tj. bicikle, motocikle ili pešake. Potrebno je uvesti sitne izmene u gornju naredbu, konkretno promeniti deo s nazivom konfiguracione datoteke.

Priprema podataka o voznom parku i korisnicima

ODL Studio zahteva kreiranja triju tabela: Stops, VehicleTypes i Stop-order. Prve dve tabele sadrže ulazne podatke, dok će se u treću tabelu, po pronalazenju optimalnog rešenja, upisati koja lokacija je dodeljena kom vozilu. Ove tabele treba da budu smeštene u jedinstvenu .XLS datoteku i to tako da svaka bude poseban radni list (engl. spreadsheet) u njoj. Radne listove treba nazvati identično kao i tabele.

Radni list Stops sadrži spisak lokacija korisnika koje treba obići. Pored osnovnih podataka o korisnicima (prvenstveno adrese za isporuku i koordinata lokacije), u ovom radnom listu se nalaze i vremenska ograničenja koja postavlja korisnik, dužina trajanja samog čina primopredaje robe kao i količina robe koja treba da mu se isporuči. Namena drugog radnog lista VehicleTypes jeste čuvanje opštih informacija o voznom parku i pripadajućim vozilima. Skladištene su koordinate početnog i krajnjeg skladišta, radno vreme dostavljača, nosivost vozila i različiti parametri pomoću kojih se računaju troškovi vožnje (fiksni troškovi, troškovi vožnje po pređenom kilometru i po proteklom satu i troškovi čekanja po proteklom satu). Poznat je i broj vozila koja su na raspolaganju u konkretnom skladištu. Treći radni list Stop-order ima ulogu tabele veze, tj. svaki njegov red će nositi informaciju o tome koje vozilo je predodređeno da obide koju lokaciju (korisnika). Ova tabela je na početku prazna i njeno popunjavanje se vrši nakon uspešnog pronalazenja seta optimalnih ruta.

Za popunjavanje tabela Stops i VehicleTypes realnim podacima, napisani su odgovarajući SQL skriptovi koji pristupaju Microsoft SQL Server bazi podataka trgovinskog lanca. Za neke kolone prve tabele je pronađen ekvivalentni podatak u bazi podataka: ID i naziv lokacije, kao i longituda i latituda u WGS84 sistemu. Adrese su dobijene postupkom geokodiranja na osnovu gorepomenutih koordinata i raspoloživog adresnog sistema. Popunjavanje ostalih kolona smislenim vrednostima se moralo simulirati na drugi način. Kako kolone job-id i required-skills ne moraju da imaju vrednosti, one su postavljene na NULL. Vrednost kolone type može da bude 'D' (skraćeno od delivery,

označava dostavu robe korisniku) ili 'P' (skraćeno od pickup, označava preuzimanje robe od korisnika). Sva-ki red tabele treba da dobije jednu od ove dve vrednosti, u zavisnosti od toga da li konkretnom korisniku treba predati robu ili treba od njega uzeti robu (npr. povrat robe). Sistem mora da uzme u obzir ovu informaciju prilikom projektovanja ruta bi se izbegla situacija da vozilo dođe na lokaciju na kojoj treba da pokupi određenu količinu robe, a da za to nema prostora u vozilu, jer ovo ograničenje nije razmotreno. Pretpostavljeno je da će približno 10% korisnika zahtevati da se s njihovih lokacija preuzme određena količina robe, dok će ostalih 90% tražiti isporuku robe na njihove lokacije. Kako bi se simulirao ovaj realan slučaj, iskorišćene su osnovne funkcije MS Excel-a.

Granice vremenskog prozora, start-time i end-time, su postavljene na identične vrednosti za sve korisnike. Zadato je da korisnik ne može da primi robu pre 5:30 č. (vrednost '05:30:00'), kao i da isporuka robe mora da se obavi do 20:30 č. (vrednost '20:30:00'). Trajanje primopredaje robe service-duration je simulirano na sličan način kao kolona type. Pretpostavka je da se vozila neće zadržavati na svim lokacijama jednako dugo. Isporuka robe nekoj manjoj radnji će obično podrazumevati istovar svega nekoliko kutija, što će trajati značajno kraće u odnosu na isporuku veće količine robe nekom supermarketu. U simulaciji se predviđa da vrednost atributa service-duration za približno 60% lokacija bude 10 minuta, za oko 20% lokacija 20 minuta, a za preostalih 20% lokacija 40 minuta. Količine robe koje zahtevaju korisnici (kolona quantity) su dobijene simulacijom na nivou SQL-a, komandom:

```
SELECT
ABS(Checksum(NewID()) % 590) +
ABS(Checksum(NewID()) % 200)
AS [quantity]
```

Sličan pristup važi i za kolone tabele s karakteristikama voznog parka – pojedini atributi mogu da se preuzmu iz srodnih atributa baze, neki mogu da uzmu vrednost NULL, određeni se mogu simulirati, a nekima se zadaju fiksne vrednosti koje su jednake za sva vozila. Podaci o identifikatorima i nazivima vozila, lokacijama skladišta, kao i vremenskim prozorima za vozila se dobijaju iz korespondentnih kolona. Količina robe za dostavu koja se može smestiti u svako vozilo (kolona capacity) zavisi od tipa vozila, odnosno od toga da li je u pitanju kombi, manji kamion ili šleper. Raspoloživ spisak vozila je klasifikovan na osnovu garažnih brojeva:

001-060 – kombi (nosivost 7000);
 061-080 – manji kamion (nosivost 8000);
 101-102 – šleper (nosivost 9500).

Dodatne sposobnosti koje poseduje vozač ili vozilo nisu razmatrane pa je vrednost kolone skills jednaka NULL. Ugledajući se na demo ulazne podatke koji se u okviru ODL Studio-a mogu kreirati za određeni broj država, unete su vrednosti parametara koji se koriste za računanje troškova rute. Tako je uzeto da je iznos troškova vožnje po pređenom kilometru '0.001', a po proteklom satu '1'.

Ukoliko je vozač primoran da zbog vremenskih prozora određeno vreme provede čekajući, troškovi čekanja će po proteklom satu iznositi '0.5'. Deo troškova koji su uvek prisutni i koji su definisani parametrom fixed-cost iznosi 100. Dodatno, definisano je da sa svake lokacije kreće jedno dostavno vozilo.

Optimizacija ruta za obilazak korisnika

Plan isporuke se odnosi na realan skup dostava robe koju su poručili korisnici raspoređeni u različitim gradovima Srbije. Modul softvera ODL Studio koji je namenjen za rešavanje problema rutiranja vozila je Vehicle routing & scheduling. Postupak iznalaženja optimalnog rešenja se sastoji od sledećih aktivnosti:

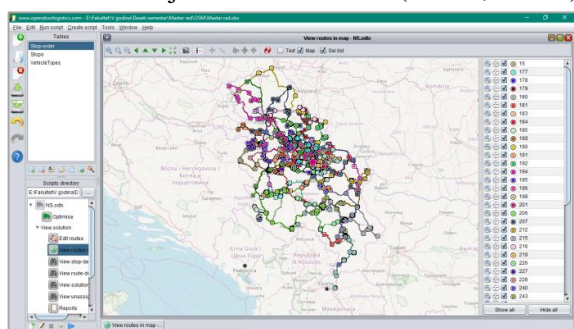
- učitavanje pripremljenih ulaznih podataka;
- pokretanje alata za pronalaženje optimalnog rešenja problema rutiranja vozila;
- analiza projektovanih ruta na karti;
- analiza Gantovog dijagrama rešenja;
- testiranje mogućnosti ručne izmene rute;
- kreiranje izveštaja rešenja;
- analiza dobijenih podataka i njihov izvoz.

U softver treba učitati kreirani graf putne mreže Srbije i .XLS datoteku s podacima o raspoloživim vozilima i postojećim porudžbinama robe. Potom treba kreirati novi skript za modul Vehicle routing & scheduling, i to s konfiguracijom Vehicle routing with 1 quantity type(s). Ova konfiguracija je odabrana budući da se u ulaznim podacima barata s jednodimenzionalnim količinama robe. U modulu je važno podesiti da se prilikom rešavanja problema optimizacije plana isporuke robe težine računaju na osnovu prethodno modelovane mreže saobraćajnica.

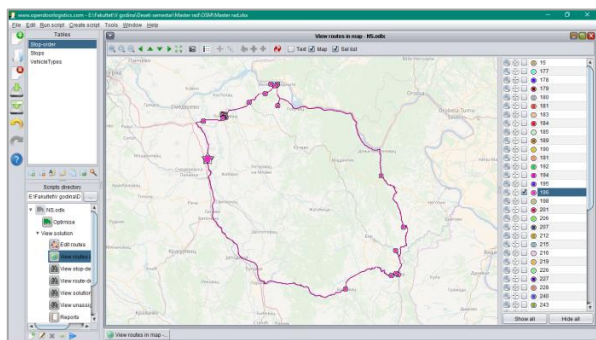
Kreiranje optimalnih ruta se pokreće opcijom Optimise. Proces optimizacije može potrajati od nekoliko sekundi do nekoliko minuta, najviše u zavisnosti od obima podataka, tj. broja lokacija koje vozila treba da obiđu. U konkretnom slučaju, vreme procesiranja ulaznih podataka je iznosilo nešto preko jedan minut. Tačan podatak nije dostupan s obzirom na to da softver po obavljenom procesiranju korisniku ne pruža nikakvo obaveštenje da je završio s radom, niti izveštaj postupka, što se može okarakterisati kao mana softvera. Pregledom tabele Stop-order se vidi da je ona sad popunjena. Svaki red predstavlja par vozilo-lokacija.

Npr. red „2055 256994“ ukazuje da je lokaciju s identifikacionim brojem 256994 predodređeno da poseti vozilo označeno identifikacionim brojem 2055.

Pregled isprojektovanih ruta se generiše komandom View routes in map iz menija View solution. Uočava se da se kao podloga koristi OpenStreetMap, a takođe i da je ruta svakog vozila obojena različitom bojom. Lokacije koje se obilaze u određenoj ruti obojene su istom bojom kao i sama ruta (slika 1, slika 2).

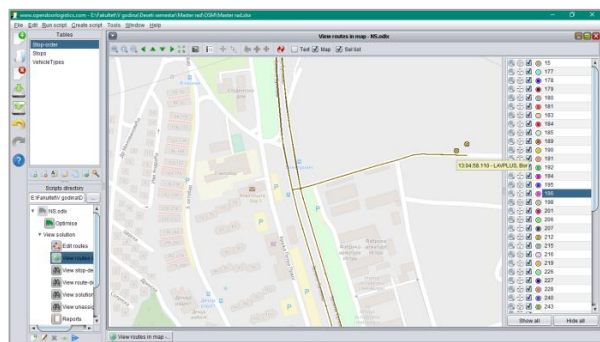


Slika 1 – Prikaz svih projektovanih ruta iscrtanih preko OpenStreetMap podloge



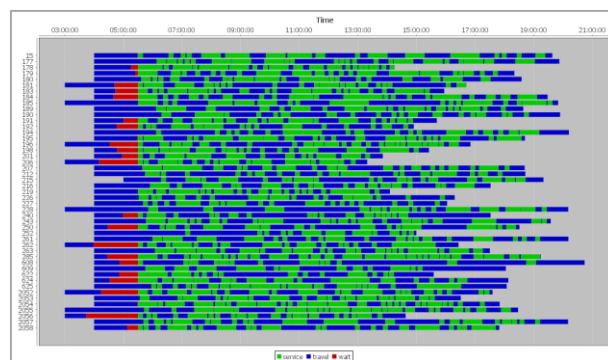
Slika 2 – Prikaz jedne projektovane rute iscrtane preko OpenStreetMap podloge

Karta je interaktivna, odnosno omogućeno je pomeranje (pan) i uveličavanje (zoom) prikaza. Isto tako, pozicioniranjem kursora miša na proizvoljnu lokaciju korisnika, stiče se uvid u adresu i vreme kada će se ta lokacija obići. Uveličavanjem prikaza do nivoa u kome se jasno mogu videti putevi, primećuje se da projektovane rute verno prate putnu mrežu, a takođe se dobija informacija kojim ulicama vozilo treba da se kreće (slika 3).



Slika 3 – Uveličani prikaz dela rute

Dinamički plan realizacije ovih ruta se može pregledati pomoću Gantovog dijagrama (opcija Gantt chart). Dobijeni gantogram je na slici 4.



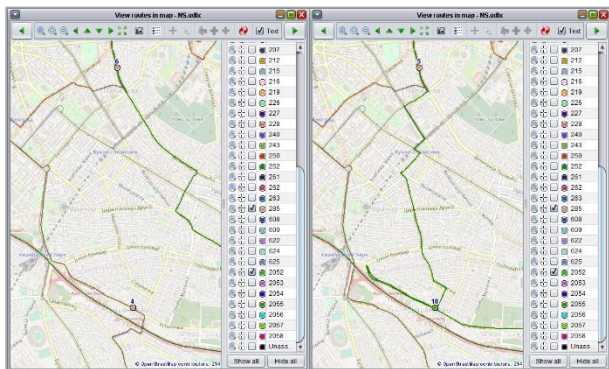
Slika 4 – Gantov dijagram dobijenog rešenja

Na vertikalnoj osi su izlistani identifikacioni brojevi vozila, a na horizontalnoj osi je prikazano vreme. Pozicioniranjem kursora miša na proizvoljni segment gantograma se dobija informacija o stanju konkretnog vozila u tom trenutku (da li uslužuje korisnika, da li stoji i čeka, da li putuje). Zelena boja u gantogramu se odnosi na vremenske periode u kojim se vrši isporuka ili preuzimanje robe, plava označava periode putovanja vozila, a crvena boja periode u kojima vozilo čeka na korisnika (npr. čeka da se radnja na korisničkoj lokaciji otvori). Čekanja vozila su posledice definisanih vremenskih prozora.

Dobro rešenje ima mali broj neaktivnih perioda, jer tada nema nikakvih benefita, a ukupni troškovi se uvećavaju. Efikasnost rešenja se ogleda u stepenu iskorišćenosti vremena, odnosno najbržem obavljanju zadatka (u gantogramu prikazani zelenom bojom), uz minimizaciju vremena putovanja koje direktno povećava troškove (plavi segmenti u gantogramu). Broj plavih segmenata u okviru jedne rute je direktno zavisao od broja zelenih segmenata i iznosi $n + 1$, gde je n broj vremenskih perioda u kojima se vrši primopredaja robe. Suma perioda usluživanja korisnika je fiksna i unapred poznata. Prema tome, ključan je odnos zelenih i plavih segmenata gantograma.

Iako je softver sa sigurnošću dao optimalno rešenje za date ulazne podatke, mora se naglasiti da je to rešenje optimalno isključivo u odnosu na definisana ograničenja. U praksi, stvari ne moraju da budu toliko striktno. Nekada je moguće ukupno uštedeti na resursima ukoliko se dozvoli neko neznatno prekoračenje pravila (blago prekoračenje definisanog kapaciteta ili malo odstupanje od zadatog vremenskog prozora). Na operateru je da odluči da li mu je to prihvatljivo, uzevši u obzir i druge faktore i svoju intuiciju. Zbog navedenih razloga postoji mogućnost ručne izmene ruta: isključivanjem pojedine lokacije iz rešenja premeštanjem u kategoriju nesvrstanih lokacija, prebacivanjem proizvoljnog korisnika iz jedne u drugu rutu ili

menjanjem redosleda posećivanja lokacija u okviru jedne rute. Na primer, ukoliko poslovna strategija kompanije dozvoljava, može se odlučiti da je bolja opcija odlaganje isporuke robe na tu lokaciju za neki drugi dan. Takođe, manuelna izmena bi mogla da da efikasnije rešenje kod ruta koje imaju međusobno preklapanje (slika 5).



Slika 5 – Izgled ruta pre (levo) i nakon (desno) prebacivanja lokacije iz jednu u drugu rutu

Pogodna forma vizuelnog i statističkog sagledavanja optimizovanog plana isporuke robe jesu izveštaji. Oni su po podrazumevanim podešavanjima u .PDF formatu, a na raspolaganju su i drugi formati: .DOCX, .CSV, .XLS, .HTML ili .XML. Izveštaj sadrži: naziv i identifikator vozila, broj lokacija u okviru rute, dužinu putovanja u kilometrima, izolovani grafički prikaz rute na OSM karti i spisak lokacija s podacima o nazivu i adresi lokacije i vremenu kada će lokacija biti posećena.

Osim vizuelnog pregleda ruta, ODL Studio nudi i kvalitetan uvid u statističke parametre koji detaljno opisuju dobijeno rešenje. Svi detalji o planiranim dostavama, rutama i kompletnom vremenskom rasporedu nalaze se u okviru nekoliko komandi pod karticom View solution. Komandom View solution-details se pokreće prikaz tabele u kojoj su sumirani različiti podaci o celokupnom rešenju. U njoj se nalazi broj planiranih ruta, broj lokacija koje se obilaze, broj nesvrstanih lokacija, broj planiranih isporuka i preuzimanja robe, ukupne količine robe koju treba dostaviti i/ili preuzeti, indikatori prekoračenja ograničenja, ukupni troškovi, ukupna pređena kilometraža, ukupno vreme koje su vozila provela u putovanju, ukupno vreme koje su vozila provela čekajući i sumarno vreme čitavog rešenja (tabela 1).

Opcija View route-details daje tabelu sa sličnim kolonama, s razlikom što su statistički parametri izlistani za svaku planiranu rutu ponaosob. Ukoliko se u nekoj ruti javljaju nepravilnosti u vidu prekoračenja ograničenja, ta ruta će biti obojena crveno. Komandom View stop-details otvara se tabela sa statistikom u vezi s planiranim lokacijama. Ova tabela je najdetaljnija. View unassigned stops služi za izlistavanje onih

lokacija koja su iz različitih razloga isključene iz plana isporuke.

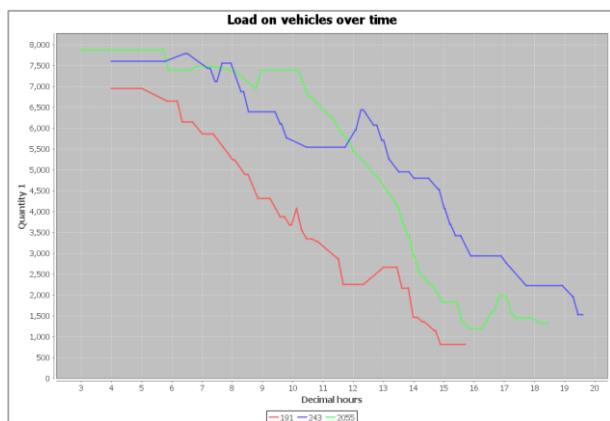
Tabela 1. Sumarni prikaz dobijenog rešenja

Broj ruta	Broj neposećenih lokacija	Broj posećenih lokacija
47	2	970
Prekoračenje kapacitivnih ograničenja	Broj prekoračenja ograničenja	Broj isporuka robe
0	0	871
Količina dostavljene robe	Broj preuzimanja robe	Količina preuzete robe
339450	99	40634
Ukupno vreme rešenja	Prekoračenje vremenskih ograničenja	Troškovi putovanja
27 dana, 00:43:11,385	00:00:00	369,369
Ukupan pređeni put svih vozila [km]	Ukupno vreme putovanja svih vozila	Vreme provedeno u čekanju
22184,845	14 dana, 02:28:51,504	17:24:19,881

Jedna opcija je da je softver sâm preskočio određenu lokaciju jer se ona nalazi na području za koje ne postoji unapred pripremljeni graf putne mreže. Treba proveriti da nije slučajno došlo do greške u koordinatama lokacije, što može da dovede do situacije da je neka lokacija greškom locirana u pogrešnoj državi i previše je udaljena od ostalih lokacija. Takođe je moguće da je lokacija odlukom menadžmenta kompanije namerno preskočena prilikom ručne izmene ruta.

Komanda View loads je veoma korisna. Njome se kreira grafikon koji prikazuje promenu količine robe u svakom vozilu kroz vreme. Svaka ruta je obojena različitim bojom, a postoji opcija uključivanja i isključivanja ruta čekiranjem pogodnih kućica. Slučajnim odabirom su izabrane tri rute za koje će se iscrtati ovaj grafikon (slika 6).

Na njemu se primećuje kako količina tereta u vozilima fluktuiru kroz vreme. Ovo je posledica različitih tipova usluga, na delu lokacija roba se istovaruje iz vozila, dok ju je na nekim lokacijama potrebno preuzeti od korisnika.



Slika 6 – Grafikon promene količine robe u vozilima kroz vreme za tri proizvoljno odabrane rute

Statističke tabele se mogu pregledati u ODL Studio-u, ali one neće biti smeštene u MS Excel tabele sve dok se ne izvrši njihov izvoz. Komande namenjene izvozu nalaze se pod karticom Export solution tables, gde postoje opcije za izvoz gorepomenutih tabela pojedinačno ili istovremeni izvoz tri osnovne tabele. Sve tri osnovne tabele biće istovremeno izvezeno pokretanjem komande Export all. Nakon što su tabele sačuvane, one se mogu otvoriti i pregledati nezavisno od ODL Studio-a. Izvezeni podaci se, kao što je već rečeno, nalaze u .XLS formatu, pa se ove tabele mogu proslediti nekom drugom sistemu koji će znati da ih pročita.

5. ZAKLJUČAK

Prepuštanjem računaru da izvrši kreiranje ruta za isporuku dobara do korisničkih lokacija, ostvaruju se višestruke koristi, te zbog toga postoji realan interes kompanija da implementiraju principe rutiranja u svoje sisteme. Izvršena optimizacija konkretnog plana isporuke robe ukazuje da je ODL Studio s inkorporiranom bibliotekom GraphHopper prilično jednostavan, a moćan alat za efikasno rešavanje tipičnih logističkih zadataka. Štaviše, može se reći da je obimniji deo zadatka pripremiti sve ulazne podatke na odgovarajući način, odnosno zadovoljiti zahtevanu formu. Koraci obrade i pronalaženja rešenja su jednostavni i logično se nadovezuju jedan na drugi. Softver je lak za korišćenje, što se može pripisati jasnoći interfejsa, ali i interaktivnim uputstvima (tutorijalima) sa zvaničnog sajta koji postupno i intuitivno vode korisnika kroz čitavu proceduru. Postoje različiti vidovi analize dobijenog rešenja, a brzina procesiranja je sasvim zadovoljavajuća.

Kombinacija ODL Studio-a s OpenStreetMap podacima daje besplatnu, efikasnu, robusnu i pristupačnu alternativu komercijalnim softverskim rešenjima iste namene. Time je potvrđena polazna hipoteza da su softver otvorenog koda i besplatni prostorni

podaci o putnoj mreži solidna osnova sistema predviđenog da rešava probleme organizovanja prevoza robe do krajnjih korisnika.

OSM podaci se svojim kvalitetom mogu nositi s kvalitetom podataka koje u ponudi imaju brojni komercijalni servisi koji nude veb-karte. Njihova velika prednost, koju koristi i ODL rešenje, jeste što su potpuno otvoreni, svima na raspolaganju i svako može da ih uređuje i koristi za svoje potrebe. Kako detaljnost, kompletnost i ažurnost OSM podataka mogu da variraju u zavisnosti od lokacije, za bolju primenu ODL-a na izradu optimalnih transportnih ruta je od velike važnosti poboljšanje kvaliteta OpenStreetMap podataka i, generalno, dalje unapređivanje i promovisanje ovog projekta čiji je cilj besplatna karta celog sveta.

6. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Vlade Republike Srbije za finansiranje ovog rada u okviru projekta TR 36020.

LITERATURA

- [1] Dantzig G. B, Ramser J. H, The Truck Dispatching Problem, *Management Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 80-91, 1959.
- [2] Bodin L, Golden B, Assad A, Ball M, *Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: the State of the Art*, Pergamon Press, 1983.
- [3] Chen W. N, Application of queuing theory to dynamic vehicle routing problem, *Global Journal of Business Research*, Vol. 3, No. 2, pp. 85-91, 2009.
- [4] Hasle G, Lie K. A, Quak E, *Geometric modelling, numerical simulation, and optimization*, Springer, Berlin, 2007.
- [5] *Open Door Logistics Studio* [Internet]. [citirano 16. 5. 2018]. Dostupno na: <http://www.opendoorlogistics.com>
- [6] *OpenStreetMap* [Internet]. [citirano 16. 5. 2018]. Dostupno na: <https://www.openstreetmap.org>
- [7] Carić T. *Unapređenje organizacije transporta primenom heurističkih metoda*, doktorska disertacija, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [8] Kumar S. N, Panneerselvam R. A, Survey on the Vehicle Routing Problem and Its Variants. *Intelligent Information Management*, Vol. 4 No. 3, pp. 66-74, 2012.
- [9] *GraphHopper* [Internet]. [citirano 18. 5. 2018]. Dostupno na: <https://www.graphhopper.com>

SUMMARY

DESIGNING OPTIMAL TRANSPORT ROUTES USING OPEN-SOURCE SOFTWARE

Vehicle routing plays a major role in the industry, primarily in companies that organize the transport of goods to end-users. The theoretical background of the vehicle routing problem has been known for many years and it has been the basis for developing a lot of commercial software solutions. However, in practice, there is a barrier in the form of the lack of affordable software solutions. The difficult access to quality and reliable spatial data relating to the road network is also a limitation. This paper looks into the possibilities of applying open source software to solve this NP-difficult problem. The free spatial data from OpenStreetMap, a joint project of the virtual community, was used as a basis for modeling the graph of the road network. The experiment was carried out over the data on vehicles and users of the specific retail chain and relates to the territory of Serbia.

Key words: *vehicle routing problem, location-based services, ODL Studio, OpenStreetMap, open source software*